

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：32643

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560145

研究課題名(和文) ボールエンドミルによる硬脆材料の切削加工に関する研究

研究課題名(英文) A study on the ball endmill process of brittle materials

研究代表者

大野 威徳 (ONO, Takenori)

帝京大学・理工学部・講師

研究者番号：70509083

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：光学ガラスに対しボールエンドミルによる曲面切削において切れ刃稜線形状が被削材の脆性破壊に及ぼす影響について試験研究を行った。供試する単結晶ダイヤモンド製工具の切れ刃稜線にミクロンオーダーの周期的な波状構造を生成して切削試験を行い、仕上げ面の脆性破壊特性を検証した結果 1. 三角波状の稜線構造の場合波形状の頂角に依存して脆性破壊特性が変化し、エンドミル加工において特定の頂角の場合脆性破壊の消失が確認できること、2. 被削材構成成分によりき裂の形態が変化すること、などを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this research, the effect of the micro structure on the cutting edge in the ball endmill process of optical glasses is investigated.

Machining tests are performed by mono-crystal diamond tools of which the cutting edge is dressed the triangle micro structure. In machining tests, it can be concluded as following, 1. Characteristics of the brittle fracture are effected by a vertical angle of the triangle structure. In the milling process, the brittle fracture is reduced by the specific vertical angle of the triangle structure. 2. The feature of brittle cracks is changed by the components of the material cut.

研究分野：機械工学

キーワード：硬脆材料 ガラス切削 脆性破壊 ボールエンドミル 切れ刃稜線形状 単結晶ダイヤモンド 集束イオンビーム加工 材料除去機構

1. 研究開始当初の背景

(1) 現在、様々な分野でガラスや超硬合金、セラミックスなどの硬脆材料を微細加工した製品が広く利用されている。従来、これら硬脆材料を微細加工する際にはエッチングなど化学反応を利用したもの、レーザなど高エネルギービームを利用するもの、研削・研磨などの砥粒加工などが利用されているが、形状の精度や自由度、加工効率や作業性の観点からいくつかの問題を抱えている。そこで、研究代表者は小径のボールエンドミルにより直接材料を除去加工し高精度な曲面形状を比較的安価に製造する方法を提案し、その加工特性を検証している。

(2) 硬脆材料の微細切削の中で、切削時に仕上げ面に発生する脆性破壊が特に問題となり、この抑制が加工法の実用化における課題のひとつとなっている。主に、脆性破壊は材料固有の機械的強度の他に加工点近傍の材料内部の応力状態に依存する。これらは材料成分や構造・組織、欠陥の分布、加工点近傍の熱分布、工具-被削材間の摩擦および加工雰囲気、さらに切込量や切削速度などの切削条件やすくい角、逃げ面摩耗幅、刃先丸みなどの工具切れ刃形状により影響を受けて変化する。特に切れ刃形状は、様々な研究成果から材料内部の応力状態を大きく変化させると考えられ、脆性破壊の抑制対策において重要な検討対象となる。切れ刃形状による脆性破壊特性への影響についてはすくい角による影響、逃げ面摩耗幅による影響およびエンドミル切削においては工具ノーズ半径による影響などが確認されているが、切れ刃稜線輪郭形状の粗さが議論されたことがない。脆性材料の切削において輪郭形状の粗さは、稜線上における切込量の不均一化を招き脆性破壊を誘発する恐れがあるためできる限りこれを抑制し輪郭を平滑に成形すべきと捉えられていた。例えば、PCD コーテッド超硬ボールエンドミルにより光学ガラスの一種であるソーダライムガラスに溝加工を施した結果、切れ刃の表面性状を構成するコーティングの粒径に応じて脆性破壊特性が変化することが確認できる。この稜線の輪郭形状の粗さが脆性破壊を引き起こす機構を解明することで、切削作業において許容しうる粗さの同定の他、総形切れ刃による機能表面の加工など応用技術への発展も期待できる。

2. 研究の目的

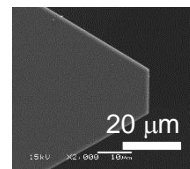
以上の研究背景から、本研究では切れ刃稜線の輪郭粗さが脆性破壊特性に及ぼす影響を解明する。バイトおよびボールエンドミルの各種単結晶ダイヤモンド製工具を利用し、各工具の切れ刃稜線上に輪郭粗さを模した周期的な微細構造を集束イオンビーム (FIB) 加工機により生成し、これら加工させた工具を用いて光学ガラスに対して形削りや曲面切削を実施し、微細構造が脆性損傷に及ぼす影響に

ついて検証することを目的とする。

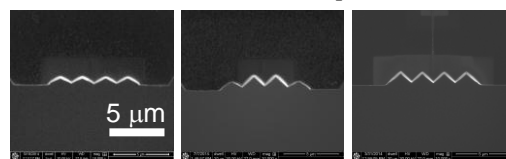
3. 研究の方法

(1) 研究では、バイトを用いた形削り切削およびボールエンドミルを用いた曲面切削を実施し、切れ刃稜線が脆性損傷に及ぼす影響を観察する。

(2) バイト切削では、切れ刃を直線的に移動させる場合に微細構造が脆性損傷に対し及ぼす影響を観察する。図 3-1 に切削試験において供試する工具を示す。幅 10 μm 、高さ 7 μm の断面を持つ超硬合金製シャンク先端に三角形の単結晶製ダイヤモンドチップを銀ロウで固定している。チップの先端に幅 15 μm 程度の平行部を成形し、これを主切れ刃とした平バイトとして利用する。主切れ刃稜線先端に三角波状の周期的微細構造を FIB により成形する。微細構造の周期は 2 μm とし、頂角を 90 および 120 度とするため振幅を 0.58、1.0 μm として成形する。成形の際、イオンビームはすくい面垂直方向に対し 3 度傾斜させ、生成した逃げ面が加工中仕上げ面に接触しないようにする。切削試験では、微細構造を施さない場合 (振幅 0 μm)、振幅 0.58、1.0 μm およびそれぞれを混合したタイプの 4 種を用いて、ソーダライムガラスおよび石英ガラスに対し同一条件で形削りを行う。試験後、発生した亀裂の進展状態を観察する目的で、生成された仕上げ面において脆性損傷が発生した箇所について、工具進行方向および仕上げ面の幅方向に向って FIB により断面を切断し、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて生成した断面を撮影した。



(a) Nose shape



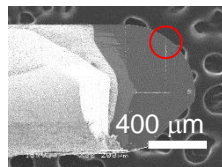
(b) A: 0.58 μm (c) A: 0.58, 1 μm (d) A: 1 μm

A: Amplitude

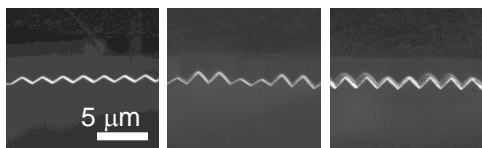
Fig. 3-1 Single crystal diamond tools

(3) ボールエンドミルによる曲面切削では、ボールエンドミルを用いて実際に曲面切削した場合に、微細構造が脆性損傷に及ぼす影響を観察する。図 3-2 に切削試験において供試する工具を示す。工具は、直径 4 mm の円柱形超硬シャンク先端に単結晶製ダイヤモンドチップを銀ロウで固定し、チップの片側のみを半径 0.5 μm の円形に成形して一枚刃としている。バイトと同様、半円の切れ刃稜線に三角波状の周期的微細構造を FIB により成形す

る。微細構造形状も、バイトと同様周期 $2\ \mu\text{m}$ とし、振幅を 0.58 、 $1.0\ \mu\text{m}$ として成形する。また、成形の際にイオンビームをすくい面垂直方向に対し 3 度傾斜させ逃げ面が加工中仕上げ面に接触しないようにする。バイト切削同様、切削試験では微細構造を施さない場合（振幅 $0\ \mu\text{m}$ ）、振幅 0.58 、 $1.0\ \mu\text{m}$ およびそれぞれを混合したタイプの 4 種を用いて、ソーダライムガラスおよび石英ガラスに対し同一条件で形削りを行う。試験では、一刃送りによる脆性損傷への影響を観察する目的で、その値を 6 および $12\ \text{nm}$ の 2 種類に設定する。また、工具傾斜による影響を観察する目的で、工具を 15 度、 30 度および 45 度に傾斜させる。なお、工具傾斜角は被削材上面に対し垂直方向を 0 度とし送りに対し工具が後退する方向を正とする。試験後、バイト切削と同様に発生した亀裂の進展状態を観察する目的で、生成された仕上げ面について、工具が進行する方向および仕上げ面の幅方向に向けて FIB により断面を切断し、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて生成した断面を撮影する。



(b) Nose shape



(c) A: $0.58\ \mu\text{m}$ (d) A: $0.58, 1\ \mu\text{m}$ (e) A: $1\ \mu\text{m}$

A: Amplitude

Fig. 3-2 Diamond ball endmill

(4) 各切削試験は図 3-3 に示す加工装置を用いる。加工機は XY2 軸のリニアステージ (分解能 $0.1\ \mu\text{m}$) と Z 軸ステッピングモータステージ (分解能 $0.01\ \mu\text{m}$) の計 3 軸で構成され、モーションコントローラにより各軸を同時制御しうる。最高回転数 6 万 rpm のブラシレスモータスピンドルを被削材に対して特定の角度で傾斜させながら Z 軸ステージ側面に治具を介して設置し、工具を傾斜させながら溝切削が行える。被削材は圧電式動力計上に設置したゴニオステージ上に設置し、工具送りに対して被削材を傾斜させながら切削を行うことが可能である。バイト切削の場合は被削材の取付け角を 0.5 度とし、工具送り $1\ \text{mm}$ につき $5.2\ \mu\text{m}$ 切込みを増加させるように設定する。バイト切削では、加工開始点から $500\ \mu\text{m}$ 進行した地点で工具-被削材間の接触を動力計により確認し、接触点から $500\ \text{mm}$ 後退させた状態で形削りを開始、理論的な実切削距離を $500\ \mu\text{m}$ とする。また、エンドミル切削の場合は被削材の取付け角を 0 度に固定し、従来の切削試験と比較する目的で軸方向切込

み $20\ \mu\text{m}$ 一定として、切削速度 $62.8\ \text{m/min}$ 、切削液に蒸留水を使用し溝切削を行う。

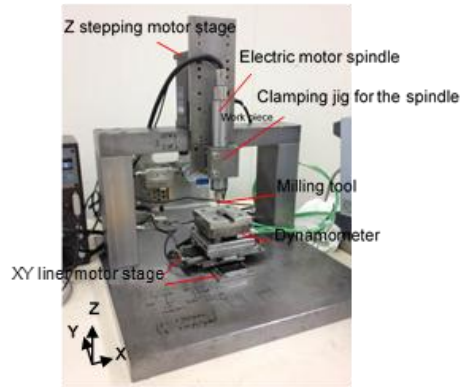


Fig. 3-3 Machine tool

(5) 各切削試験とは別に、エンドミル切削において、微細構造を有する切れ刃が材料を切削する過程を検証する目的で切削シミュレータを開発する。切れ刃稜線上に微細構造が存在する場合、その形状により切込量が変化すると考えられる。切込量の局所的な変化は切れ刃近傍の材料内部の応力状態が変化し、脆性破壊特性を変化させる可能性がある。そのため、切削過程における切込量の変化を形状ごとに検討し、切削試験の結果と比較して脆性破壊のメカニズムを検証することが望まれるため本シミュレータを開発する。シミュレータは、任意の切れ刃稜線形状を工具中心軸および半径方向の座標点で定義し、任意の工具傾斜と送り、回転速度で切削する場合の稜線各点の移動軌跡を時系列的に求め、仕上げ面および切れ刃の位置関係から切込量を求める。また、シミュレータは工具経路の変化に伴い工具姿勢が時系列的に変化する場合についても解析が実施できるようにする。

4. 研究成果

(1) バイト切削においては、切れ刃稜線形状により脆性損傷特性が変化することが確認された。図 4-1 に各バイト工具でソーダライムガラスを切削した場合の仕上げ面性状を示す。振幅 $0\ \mu\text{m}$ 、すなわち微細構造を生成しない場合、いくつかの脆性損傷は確認されるが、面全体で延性的な仕上げ面が生成されている。他方、微細構造を生成した工具については特定の切込みで脆性損傷が発生し、それぞれの形状によりその形態が異なっている。ここで、各仕上げ面においてシェル状亀裂が生成される直前の仕上げ面を観察すると、振幅 $0.58\ \mu\text{m}$ および混合振幅の場合で仕上げ面中央部に微細な亀裂が観察されるのに対して、振幅 $1.0\ \mu\text{m}$ ではシェル状亀裂の発生まで亀裂の発生は確認されず延性的な仕上げ面が生成されている。ここで、微細構造間での亀裂の進展状態を観察する目的で図 4-2 にシェル状亀裂が発生する直前の仕上げ面を幅方向に向けて FIB により切断した断面を示す。振幅 $0.58\ \mu\text{m}$ では微細構造が転写された部位を囲むように層状の亀裂が発生している。混合振幅におい

では、より幅の広い亀裂が層状に進展している。他方、振幅 $1.0 \mu\text{m}$ では上記した層状の亀裂は確認できない。現時点で切削中の内部応力を正確に観察する方法が無く、推測するにとどまるが微細構造の頂角により切れ刃稜線近傍の材料内部における応力状態が変化し、発生する亀裂の進展方向が変化したためと考えられる。

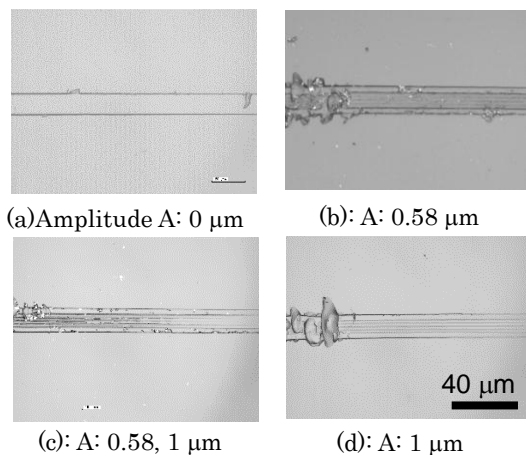


Fig. 4-1 Machined surface
Cutting conditions: Tool, single crystal diamond tool; material cut, soda lime glass; feed rate, 60 mm/min; rotational speed, 20000 rpm; maximum depth of cut, 0.0026 mm; and lubrication, dry.

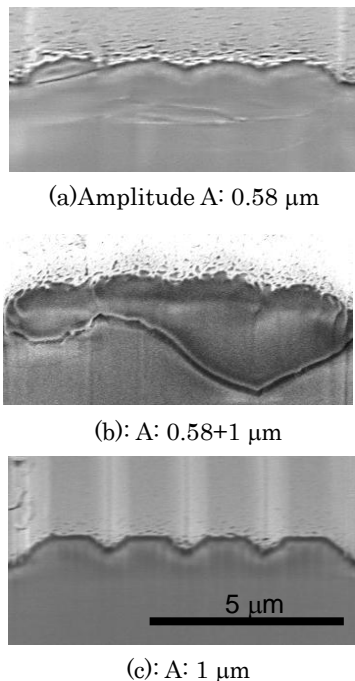


Fig. 4-2 Cross section of the surface
Cutting conditions are same as those in Fig. 4-1

(2) ボールエンドミル切削においても切れ刃稜線形状ごとに脆性破壊特性が変化し、特に頂角が 90 度 (振幅 $1 \mu\text{m}$ 、周期 $2 \mu\text{m}$) において脆性破壊の抑制効果が確認された。図 4-3 に各エンドミル工具でソーダライムガラスを溝切削した場合の仕上げ面性状を示す。切削時の工具は各図下側から上側に向かって進行し、切れ刃は左から右側に向かって回転している。

微細構造を生成しない工具においても微細な損傷が仕上げ面に発生している。また、振幅 $0.58 \mu\text{m}$ の場合、仕上げ面のダウンカット側に大きな剥離状亀裂が複数発生していることが確認できる。混合振幅の場合は位置に関係なく仕上げ面全体に微細な剥離状亀裂が発生している。他方、振幅 1 ミクロンの場合では微細な亀裂が確認されるものの他の条件と比べて平滑な仕上げ面が生成されていることがわかる。図 4-4 に各仕上げ面を工具の送り方向に向けて FIB により切断した断面を示す。振幅 $0.58 \mu\text{m}$ についても開始点と同様のクサビ状亀裂が仕上げ面下部に進展している。複合振幅の場合は進展深さ最大 2 ミクロン程度まで剥離状の亀裂が発生している。他方、振幅 $1.0 \mu\text{m}$ では材料内部への亀裂の進展は観察できない。これらの違いは以下の通りに考察される。試験における工具の一刃送りは理論上 6nm で、微細構造の振幅と比べてはるかに小さい。理論的に考えると、微細構造を有するボールエンドミルで溝切削を行う場合、加工を開始した段階では各構造が仕上げ面に転写された状態であるが、工具送りを開始した直後では構造の片側の稜線で仕上げ面を除去しゆき、さらに構造の振幅を超えて工具が進行した後は各構造の垂直方向の高低差だけ削り残された材料表層を構造の先端のみが削るようになる。ただし、この場合は実際の切込みがわずかなので頂角が変化したとしても大きな影響はないと考えられる。しかしながら、実際の切削ではスピンドルの仕様上、サブミクロンレベルの工具の振れが発生しており、これに応じて同程度の切込量の変動が発生する。切込みが延性条件を超えて過大となる場合に構造の頂角による影響が発生し、局部的に亀裂が発生して工具通過後も仕上げ面に残留する。今回の試験において、振幅の変化により損傷の特性が変化した原因については以上が考えられる。

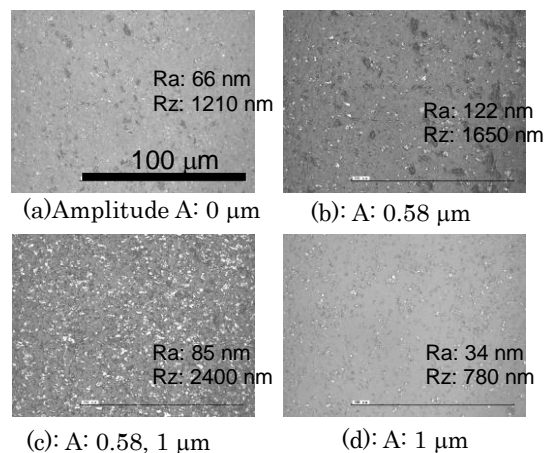


Fig. 4-3 Machined surface
Cutting conditions: Tool, R0.5 single crystal diamond ball endmill; material cut, soda lime glass; feed rate, 0.24 mm/min; rotational speed, 20000 rpm; feed rate per edge, 12 nm/edge; cutting speed, 62.8 m/min; depth of cut, 0.05 mm; and lubrication, water.

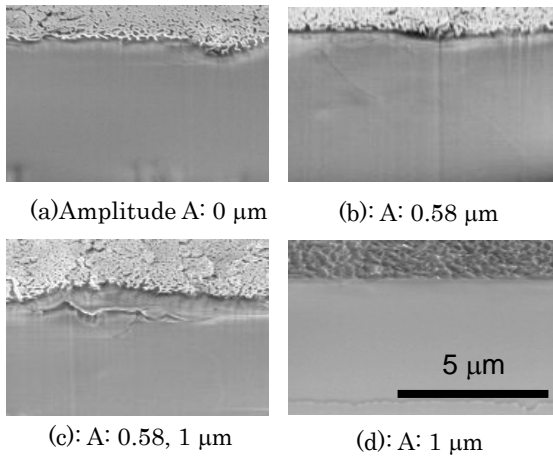


Fig. 4-4 Cross section of the surface
Cutting conditions are same as those in Fig. 4-3

(3) 頂角 90 度 (振幅 1 μm 、周期 2 μm) の微細構造化した工具を用いて、工具姿勢を 15 度および 30 度に変化させて (2) と同一の溝切削を実施した。図 4-5 は、各姿勢でソーダライムガラスを溝切削した場合の仕上げ面性状を示している。図 4-3 の 45 度の場合とそれぞれを比較すると、30 度でより平滑化した平面が局部的に生成されているが併せて比較的規模が大きな脆性損傷も生成されている。15 度では面全体に大規模な脆性損傷が発生しており平滑化の効果は見られない。今回、時間の関係で仕上げ面下部の断面観察を行えなかったため光学写真の撮影結果のみを報告する。

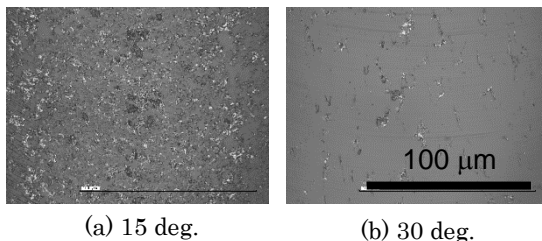


Fig. 4-5 Machined surface
Cutting conditions are same as those in Fig. 4-3

(4) 石英ガラスについて、(2) と同様の切削試験を実施した。ただし、切削による破損を考慮し切れ刃形状については頂角 90 度 (振幅 1 μm 、周期 2 μm) の工具のみを用いた。図 4-6 に、溝切削による仕上げ面性状を示す。図 4-3 に示すソーダライムガラスに対し、延性的な仕上げ面は確認できず、面全体に微細な亀裂が発生している。図 4-7 に仕上げ面断面を示す。亀裂が面全体に発生するもののその進展は 1 μm 以下に収まることが示されている。亀裂の発生については荷重に対する各ガラスの変形挙動が異なり、石英ガラスの場合は微細構造の先端形状に影響を受けやすいためと考えられる。なお、今回の試験では上述の通り切れ刃の破断を考慮して微細構造を施さない条件での試験を中止しており、(新品工具に対する) 微細構造による損傷の抑制効果については明らかになっていない。これについては、別の工具を用いて近日中 (報告後 6 ヶ月以内) に試験を実施し確認する予定である。

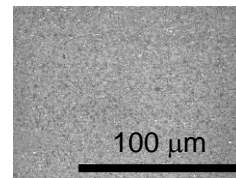


Fig. 4-6 Machined surface
Cutting conditions are same as those in Fig. 4-3

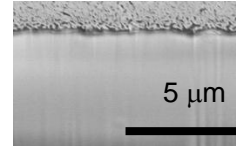


Fig. 4-7 Cross section of the surface
Cutting conditions are same as those in Fig. 4-3

(5) シミュレータにより、工具が円周上を正弦波状に上下動する移動軌跡を描きながら切削する際の切込量の時間変化を計算した [学会発表⑧]。工具傾斜角、回転数および送りを一定とし、円形軌道に対し正弦波状に上下動させる軌跡について上下動の振幅を変化させて解析を行った結果、軌跡の変動とともに工具姿勢の変化と、これに連動した切れ刃稜線の実切削領域の変化をシミュレートできた。計画では、この機能を発展させ任意の工具振動を発生させた場合の工具切込量の変化について解析可能とする予定でいたが、時間の都合上中止した。また、本シミュレータによる解析結果を利用し、エンドミル切削における切れ刃稜線近傍の応力状態の変化について粒子法などを用いて解析する計画で居たが、適切な解析ソフトを用意できず、また時間の制約でこれを中止している。本課題については、現在継続して作業を行っている。

(6) 切れ刃稜線の曲率による影響について正面旋盤を用いた旋削加工により観察する予定でいたが、旋盤の故障により省略した。正面旋盤については、本報告書提出時点で修理が完了しており近日中に実験を実施する予定である。

(7) 切削方向に対する切れ刃稜線の傾斜による影響についても正面旋盤を用いた旋削加工により観察する予定でいたが、上記の故障により省略した。この課題についても (6) と同様に近日中に実験を実施する予定である。

(8) 計画した課題のうち (1), (2) については完了し、(3)-(7) については現在継続して実施している。以上、一部完了していないが、主題となる (2) について一定の研究成果が得られており、研究の主要な目的は概ね達成したと言える。本研究課題において、1. ボールエンドミルによるガラスの曲面切削において切れ刃稜線の凹凸形状の『振幅』が脆性破壊に影響すること、2. 適切な微細構造と適切な条件による脆性損傷の抑制効果を明らかにしたことは重要な成果と言え、今後の技術開発に大きく寄与するものと期待される。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 大野 威徳、ガラス切削において切れ刃稜線形状が脆性破壊特性に及ぼす影響、九州産業大学工学部研究報告、査読有、第 49 号、2013、pp. 1-4
- ② 大野 威徳、切れ刃稜線形状を考慮したボールエンドミル切削過程の数値解析、九州産業大学工学部研究報告、査読有、第 49 号、2013、pp. 5-8
- ③ 大野 威徳、集束イオンビームによる単結晶ダイヤモンド工具の再成形、九州産業大学工学部研究報告、査読有、第 49 号、2013、pp. 9-12

[学会発表] (計 14 件)

- ① Takenori ONO、Effects of the cutting edge serrations on the brittle fracture in the glass milling、4M/ICOMM2015 Conference、2015 年 3 月 31 日、ミラノ市 (イタリア)
- ② 大野 威徳、光学ガラスの微細切削において被削材料が脆性損傷に及ぼす影響、2015 年度精密工学会春季大会学術講演会、2015 年 3 月 17 日、東洋大学 (東京都・文京区)
- ③ 大野 威徳、光学ガラスのエンドミル切削において切れ刃稜線の粗さが脆性損傷に及ぼす影響、2015 年度精密工学会春季大会学術講演会、2015 年 3 月 17 日、東洋大学 (東京都・文京区)
- ④ Takenori ONO、Effects of the cutting edge shape on the brittle cracking in the glass cutting -Effects of the deviation of the roughness curve vertex-、The 7th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century、2013 年 11 月 8 日、ホテル松島大観荘 (宮城県・松島町)
- ⑤ Takenori ONO、Characteristics of the Brittle Cracking by the Cutting Edge Roughness in the Glass Cutting、28th Annual Meeting of the American Society for Precision engineering、2013 年 10 月 22 日、ミネアポリス市 (米国)
- ⑥ 大野 威徳、ガラスの微細切削における切れ刃稜線形状による脆性破壊への影響 -形状の偏りがき裂の進展挙動へ与える影響、2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会、2013 年 9 月 13 日、関西大学 (大阪府・吹田市)
- ⑦ Takenori ONO、Effect of the tool locus on the cutting thickness in the ball endmill process、8th International Conference on Micro Manufacturing、

2013 年 3 月 27 日、ピクトリア市 (カナダ)

- ⑧ 大野 威徳、ガラスの微細切削において切れ刃稜線形状が脆性破壊に及ぼす影響、日本機械学会九州支部第 66 期総会・講演会、2013 年 3 月 13 日、九州産業大学 (福岡県・福岡市)
- ⑨ 大野 威徳、ボールエンドミル切削における切削厚さの解析、日本機械学会九州支部第 66 期総会・講演会、2013 年 3 月 13 日、九州産業大学 (福岡県・福岡市)
- ⑩ Takenori ONO、Effects of the tool edge shape on the brittle cracking in the glass machining、27th Annual Meeting of the American Society for Precision engineering、2012 年 10 月 22 日、サンディエゴ市 (米国)
- ⑪ 大野 威徳、ガラスの微細切削における脆性破壊特性、日本機械学会九州支部福岡講演会、2012 年 9 月 29 日、福岡工業大学 (福岡県・福岡市)
- ⑫ 大野 威徳、ガラス切削において切れ刃稜線形状が脆性破壊特性に及ぼす影響、2012 年度精密工学会秋季大会学術講演会、2012 年 9 月 14 日、九州工業大学 (福岡県・北九州市)
- ⑬ Takenori ONO、Numerical simulation of the micro milling process with sine-wave edge shapes、7th International Conference on Micro Manufacturing、2012 年 3 月 13 日、シカゴ市 (米国)
- ⑭ 大野 威徳、切れ刃稜線形状によるガラス切削の脆性破壊特性、日本機械学会中国四国支部第 50 期総会・講演会、2012 年 3 月 8 日、広島大学 (広島県・東広島市)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大野 威徳 (ONO, Takenori)

帝京大学・理工学部・講師

研究者番号： 70509083

(2) 研究分担者

松村 隆 (MATSUMURA, Takashi)

東京電機大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号： 20199855

(3) 連携研究者

なし